

氏 名 井上 優貴

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1825 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Development of POLARBEAR-2 receiver system for cosmic
microwave background polarization experiment

論文審査委員 主 査 准教授 岡村 崇弘
教授 羽澄 昌史
准教授 田島 治
准教授 都丸 隆行
助教 住澤 一高
教授 片山 伸彦 東京大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

POLARBEAR-2 は宇宙マイクロ波背景放射の B モード偏光の精密測定を目的とする地上実験である。B-mode 偏光はインフレーション起源および重力レンズ起源に分類され、精密な観測によってインフレーションのモデルやニュートリノ質量和の制限を与える事ができる。

POLARBEAR-2 はインフレーションモデルについてはテンソルスカラー比に対して $r \sim 0.01$ (95% C.L.) および、ニュートリノ質量和に対して $\Sigma m_\nu \geq 90 \text{ meV}$ (68 % C.L.) の制限が与えられる。

POLARBEAR-2 実験は 250mK に冷却した 7588 個の超伝導ボロメータを用い、前景放射の効率的な分離のために 95GHz と 150GHz の 2 周波数で観測を行う。発表者はこれらの受信器システムの特に低温光学についての開発を行ってきた。

POLARBEAR-2 受信機システムは大きく分けて、検出器及び信号の読み出し回路を収める「レシーバー部」と入射する CMB を焦点面上で再結像するための「光学系部」の 2 つからなっている。それぞれパルスチューブ冷凍機で 4K まで冷却した後、レシーバー部はヘリウムソープション冷凍機を用いて焦点面を 250mK まで冷却する。光学系を構成する各光学素子も熱由来のノイズを低減するために 4K に冷却する。POLARBEAR-2 では (PB-1 と比較して) 検出器の数を増やすことで実験感度の向上を図るが、一方で焦点面と望遠鏡の口径を大きくする必要が生じる。結果として焦点面や光学素子の収差と、4K に配置した光学素子への輻射が大きくなり、従来の光学設計では冷却が困難になる事が予想される。従って光学系の収差を抑制しつつ、外部や光学系自身からの熱輻射の影響を小さくする為の綿密な熱・光学の設計が必要不可欠である。発表者はこれらの問題を解決するための光学系の開発をおこなった。

まず、収差を抑制するためには口径が大きく屈折率の高い光学材料を用いた光学系の構築が必要である。発表者は CMB の波長帯であるミリ波では新しい材料であるアルミナを用いた光学系を検討し評価開発を行った。さらに、アルミナは表面反射率が高い物質で知られており、表面反射を抑制するための反射防止膜の開発を行った。発表者は新しく最大直径 530mm の二層反射防止膜を低温で実現できる、ムライト-スカイボンドフォーム法を確立した。また、フィルター自身からの熱輻射を抑制するために、アルミナ赤外線吸収フィルターを新たに開発した。従来の吸収フィルターは熱伝導率が低く、高い熱輻射の環境に配置すると中心温度が上昇する。そこで効率よく冷却するために熱伝導率の高いアルミナのフィルターを開発した。透過率は双方の周波数帯で 95.8%、カットオフ周波数は 650GHz、温度上昇は 3K に抑制できた。従来のフィルターを用いた温度上昇は約 100K であり、温度差を 1/30 にする事に成功した。また、窓から流入する迷光を抑制するために、新しい電波吸収体「KEK Black」を発明した。

発表者はこれらの光学素子を実際の受信器システムに設置して、光学・冷却試験をおこない、大型低温光学系を実証した。まず実測に基づいた光学シミュレーションを用いて、7588 個の検出器がすべて回折限界を満足し、サイドローレベルも 95GHz と 150GHz において、-21dB, -25dB 以下となる事が期待出来る事を示した。次に、全ての温度ステージで測定した熱負荷が許容熱負荷以下である事を実証した。その結果、検出器は 250mK に十分冷却され、38 時間の冷却保持時間を達成した。また、計算した最終的な実験感度は $3.42 \mu\text{K}\sqrt{\text{sec}}$ である。

最後にこれまでに開発を行ってきた光学素子とプロトタイプ検出器を POLARBEAR-2 受信機システムに搭載し光学試験を行った。検出器は実際の観測で用いる 150GHz と 95GHz 帯の 2 種類を使用した。試験では光学特性をシミュレーションと比較する事で評価

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

する為のビームの評価と、光学系の **Optical efficiency** を評価する為のパワー評価試験を行った。発表者はビーム評価を行う為にナイフエッジ法と呼ばれる手法を応用して、ビーム形状を測定した。測定したビームはシミュレーションと 1σ の信頼度で一致し、期待される光学性能を満たす事を実測した。また、**Optical efficiency** の評価試験では軸外楕円鏡を用いて液体窒素温度に冷却した黒体からの輻射を測定した。測定した結果からパワーを見積もり、**Optical efficiency** を推定した。統合試験の結果、ビームと **Optical efficiency** について計算値と矛盾しない結果が得られた。したがって、回折限界を満たし、**NET array** $\sim 3.39 \mu K \sqrt{\text{sec}}$ を満たす光学系の構築が期待できる。発表者が開発して来た光学系は観測用の検出器 7588 個と組み合わせてチリでの本観測を目指す。今後はシステム全体での感度を満たす為に偏光試験、分光試験、ビーム試験を行う。本研究で行った光学系の評価結果は、観測用の検出器を受け入れる事のできる低温光学系の開発が完了した事を意味しており、発表者は世界最高感度が期待できる低温光学系の構築を達成した。また、発表者が開発を行って来た要素技術は、将来計画である **Simons Array** や **LiteBIRD** 実験でも応用が可能である。発表者は観測の最前線から将来に渡って必要不可欠なスタンダード技術の確立を達成した。

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

POLARBEAR-2 は宇宙マイクロ波背景放射の B モード偏光の精密測定を目的とする地上実験である。B-mode 偏光はインフレーション起源および重力レンズ起源に分類され、精密な観測によってインフレーションのモデルやニュートリノ質量和の制限を与えると期待されている。これを実現するために、POLARBEAR-2 では 250mK に冷却した 7588 個の超伝導ボロメータを用い、前景放射の効率的な分離のために 95GHz と 150GHz の 2 周波数で観測を行う。これは現在走っている POLARBEAR-1 と比べて検出器の数を増やすことで実験感度の向上を図る画期的な装置である。一方で、焦点面と望遠鏡の口径を大きくすることに起因して、焦点面や光学素子の収差と 4K に配置した光学素子への放射が大きくなることから、従来の光学設計では冷却が困難となることが考えられてきた。

こうした困難を打開するべく、井上氏は光学系の収差を抑制しつつ、外部や光学系自身からの熱放射の影響を小さくする為の綿密な熱・光学の設計を行った。特に①CMB の波長帯であるミリ波では新しい材料であるアルミナを用いた光学系に着目し、干渉を用いた表面反射を抑制する二層反射防止膜の開発（ムライト-スカイボンドフォーム法の確立）、②効率よく冷却するために熱伝導率の高いアルミナフィルターの開発、③窓から流入する迷光を抑制するための新しい電波吸収体「KEK Black」を開発した。これらの単体性能試験の結果、①については双方の周波数帯で 95.8%の透過率を実現、②については 650GHz のカットオフ周波数、温度上昇は従来のフィルターの約 1/30 の 3K に抑制されることを検証している。

更に同氏は、上述の開発した光学素子とプロトタイプ検出器を POLARBEAR-2 受信器システムに搭載し、要求性能を満たすことを検証する実験を行っている。具体的評価項目は、光学特性を評価する為のビームの評価、光学系の Optical efficiency を評価する為のパワー評価である。前者については、ビーム評価を行う為にナイフエッジ法と呼ばれる手法を応用しビーム形状を測定し、シミュレーション結果と 1σ の信頼度で一致することを明らかにしている。後者の Optical efficiency の評価試験では、軸外楕円鏡を用いて液体窒素温度に冷却した黒体からの放射を測定し、パワーを見積もることで Optical efficiency を推定している。こうした統合試験からビームと Optical efficiency について計算値と矛盾しない結果を得ており、このことから本研究により開発された低温光学系要素技術を用いれば、回折限界を満たし、 $\text{NET array} \sim 3.39 \mu \text{K} \sqrt{\text{sec}}$ を満たす光学システムの構築が可能となる。本研究で行った光学系の一連の評価結果は、観測用の検出器を受け入れる事のできる低温光学系が開発が完了し、世界最高感度が期待できる低温光学系の構築を達成したことを意味するものである。更に本研究により開発された低温光学系要素技術は、将来計画である Simons Array や LiteBIRD 実験でも十分応用が可能であり、同氏の一連の研究によりミリ波観測の最前線から将来計画にも適用できるスタンダード技術の確立を達成したと言える。

以上に述べたとおり、井上氏は、世界最大級の焦点面を有する POLARBEAR-2 の低温光学系を実現可能なものとする低温光学システムの開発に主導的役割を果たした。同氏が主著者の国際雑誌論文（査読あり）も出版されている。また本審査の結果、同氏が行ってきた一連の研究内容は特許も取得するなど最先端かつ独創的な成果が十分含まれており博士

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

論文として成り立つものと認められた。以上より井上優貴氏の博士論文本審査を合格とする。